

长距离定向连续取心技术在岩土勘察中的应用与研究

——以新加坡HDC3-1地铁勘察项目为例

苟晓东

(中铁第一勘察设计院集团有限公司陕西省铁道及地下交通工程重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘要: 针对长距离定向钻进技术中存在的钻孔轨迹控制难、连续取心效率低等核心问题, 本文以新加坡城市轨道交通HDC3-1岩土勘察项目的应用为基础开展研究, 通过优化整合定向取心技术(DCD)与NQ绳索取心工艺, 可实现目标孔段内长距离定向钻进与连续取心的同步作业。与传统的勘察技术相比, 定向连续取心技术具备钻孔轨迹可控、取样连续、工期短、综合成本低、对环境污染小的优势。实践应用验证了其可行性和实用性, 为岩土勘察提供了更多的途径和方法。

关键词: 岩土勘察; 定向钻进; 定向连续取心; 绳索取心

中图分类号: P634; U452.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)05-0134-08

Application and research of long-distance directional continuous coring technology in geotechnical investigation: A case study of the Singapore HDC3-1 metro project

GOU Xiaodong

(Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an Shanxi 710043, China)

Abstract: Aiming to address the core challenges in long-distance directional drilling technology, such as difficulties in controlling borehole trajectories and low efficiency in continuous coring, this paper presents the application of Long-distance Directional Continuous Coring (LDC) technology in Singapore's HDC3-1 geotechnical investigation project. By optimizing and integrating the Directional Coring Drilling (DCD) process with the NQ wireline coring method, this technology enables simultaneous long-distance directional drilling and continuous coring within the target borehole intervals. Compared to traditional investigation techniques, LDC offers advantages including controllable borehole trajectories, continuous sampling, shorter project timelines, lower comprehensive costs, and minimal environmental impact. The successful implementation of this innovative technology has demonstrated its feasibility and practicality, providing enhanced approaches and method for geotechnical investigation.

Key words: geotechnical investigation; directional drilling; directional continuous coring; wireline coring

0 引言

定向钻进技术起源于石油钻井行业, 经多年发

展已拓展至隧道工程地质勘察及灾害处置^[1-2]、市政管道铺设^[3]、煤矿水害治理^[4]等多个领域。采用定

收稿日期: 2025-03-03; 修回日期: 2025-05-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.05.018

作者简介: 苟晓东, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 地质专业, 硕士, 主要从事岩土工程勘察设计方面的工作, 陕西省西安市雁塔区西影路2号, 15829254977@163.com。

引用格式: 苟晓东. 长距离定向连续取心技术在岩土勘察中的应用与研究——以新加坡HDC3-1地铁勘察项目为例[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 134-141.

GOU Xiaodong. Application and research of long-distance directional continuous coring technology in geotechnical investigation: A case study of the Singapore HDC3-1 metro project[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 134-141.

向钻进技术,将垂直孔的点勘察,优化成为水平孔的线勘察,使之成为沿隧道轴线的全线无盲点勘察^[5-8]。然而,传统定向钻进技术在实际应用中面临两大核心挑战:其一,钻孔轨迹的精准控制难度高,尤其在复杂地层中易受岩性变化、钻具偏移等因素影响,导致目标层位定位偏差;其二,定向钻进与连续取心难以兼顾,常规工艺往往需交替进行轨迹调整与取心作业,不仅效率低,且易造成岩心破碎或地层扰动,影响数据可靠性。现有技术中,定向取心钻进(如Devico Core Drill, DCD)虽能实现高精度轨迹控制,但其取心连续性及作业效率受限于频繁起下钻^[9];绳索取心技术(如NQ系列)虽可保障连续取样,却难以满足复杂轨迹的定向需求^[10]。

针对上述问题,国内外学者开展了系列技术优化研究。胡郁乐等^[11]通过坑道定向钻进系统的适应性分析指出,现有水平勘探工艺在长距离硬岩地层中虽能维持轨迹精度,但受限于间断式取心模式,难以保障岩心采取率与地层原状性。另一方面,绳索取心技术(如NQ系列)凭借无需提钻即可获取岩心的优势,在连续取样领域得到广泛应用,但其缺乏主动导向机制,难以满足复杂轨迹定向需求。近期,韩泽龙等^[12]通过钻具结构优化与取心参数仿真,验证了定向取心钻具在特定工况下的可行性,但其研究聚焦于短距离孔段,未解决长距离钻进中轨迹控制与连续取心的协同难题。由此可见,现有技术多侧重单一性能提升,而DCD(定向取心钻进)与绳索取心工艺的割裂,直接导致勘察周期延长、成本攀升,制约了定向钻进技术在城市密集区岩土工程中的规模化应用。

尽管国内外已有尝试整合两类技术的探索,但其适用性、经济性及工程稳定性仍缺乏系统性验证。本文以新加坡城市轨道交通HDC3-1岩土勘察项目为工程背景,探讨了长距离定向连续取心技术(Long-Distance Directional Continuous Coring, LDC)的可行性与实用性,该技术通过优化整合DCD定向取心钻进工艺与NQ绳索取心工艺,可实现目标孔段内长距离定向钻进与连续取心的同步作业。

1 工程概况

1.1 项目概况

新加坡地铁跨岛线CRL(Cross Island Line)是新加坡兴建的第八条地铁线,是新加坡最长的全地

下地铁线,全长约56 km,分三个阶段实施,其中跨岛线第二阶段路线将从地面以下70 m处,穿过中央集水带自然保护区。它将光明山地铁站衔接到马城地铁站、阿尔柏王园站、马裕站、金文泰站、西海岸站和裕廊湖区站,长约15 km,预计2032年竣工。

项目业主对该勘察工作的要求:(1)获得该区段隧道线路水平轴线方向范围内连续的围岩岩土信息;(2)钻孔轨迹须位于地铁隧道结构顶部上方6 m围岩位置,并且轨迹偏差不得超过垂直和水平公差 ± 5 m的范围;(3)中央蓄水池为自然保护区,禁止在该保护区内采用传统的立轴式钻机实施岩土勘察。

针对项目的要求,为解决传统垂直点式勘探在水平方向岩土取样不连续、代表性不足,以及无法进行长距离定向连续取心钻进的问题,研究分析后,计划采用长距离定向连续取心勘察新技术,沿着设计的地铁隧道轴线靶区范围内进行勘察工作。

1.2 地质构造与地层岩性

根据初步岩土勘察资料可知,规划设计地铁线路范围内以武吉知马花岗岩为主。基岩上方以强风化(GⅣ)至中等风化(GⅢ)花岗岩为主,基岩深度为40 m,以微风化(GⅡ)至中等风化(GⅢ)花岗岩为主,按《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)属坚硬岩($R_c > 60$ MPa)^[13-14]。

2 技术难点分析与对策

2.1 钻孔轨迹控制难

钻孔轨迹必须位于地铁隧道顶部上方6 m位置,并且轨迹偏差不得超过公差 ± 5 m的靶区范围内。受重力因素钻孔轨迹较难控制。长距离水平孔,距离长,钻具质量大,受重力影响,轨迹容易发生偏斜。此外,长距离定向钻孔,对地质岩层条件也有要求,松软、软弱地层段不易进行造斜定向钻进。造斜定向段需要有坚硬的钻孔表面为造斜提供条件。长距离连续取心要达到以上要求,难度很大。主要对策是分析研究采用长距离定向连续取心工艺。使用可靠的定向钻探钻具,严格控制钻进参数,并对钻孔轨迹进行实时测量,如方位角、倾角、高程等,若钻孔偏离设计轨迹,及时进行轨迹纠偏工作。

2.2 长距离定向钻进连续取心难

该项目的技术难点是定向造斜钻进的同时进行取心。取心工具轴线与重力线存在一定夹角,容易造成取心工具阻卡现象。此外,井眼轴线与钻具

轴线不重合,导致下部钻具稳定性较差,岩心不能均匀进入岩心管。项目要求勘察孔在定向钻进的同时,获得该地铁区段隧道线路轴线范围内1 km的连续岩土信息。难度较大。主要对策是:(1)分析研究使用特制的定向连续单动双管取心钻具,外岩心管转动,内岩心管不转动,具有对岩心扰动较小,取心率高的优点。(2)控制钻孔弯曲强度、钻进参数,防止卡钻、断钻、堵心,保证岩心采取率,在完成定向钻进的同时,实现连续取心。

3 新型长距离定向钻进连续取心钻具与工艺方法

结合工程需求,针对长距离定向水平孔钻孔轨迹控制难、连续取心难度大的技术难点,分析研究采用了DCD定向连续取心钻具。并制定提出了长距离定向孔连续取心工艺技术。

3.1 DCD定向孔连续取心钻具

DCD定向连续取心钻具由钻头、扩孔器、扶正环、变向控制机构、内外岩心管、岩心卡取机构、定向造斜机构等组成(见图1)。



图1 DCD定向连续取心钻具

Fig.1 DCD directional hole continuous coring drill tools

3.1.1 取心钻头

NQ取心方法的取心钻头直径为75.7 mm,内径为47.5 mm,岩性内外管环状间隙小,无法实现造斜定向钻进的同时进行取心工作。而DCD取心方法,其取心钻头外径为75.7 mm,内径为31.5 mm(见图2)。DCD内外径较大差异,提供了较大的内外岩心管环状间隙,目的是为变向偏心圆控制机构、定向造斜机构提供弧度空间,为不对称空心圆柱体的偏心,提供空间,以改变钻头方向,实现定向钻进。



(a)NQ取心钻头

(b)DCD取心钻头

图2 取心钻头对比

Fig.2 Coring bit comparison

3.1.2 内岩心管及岩心卡取机构

相比于常规NQ绳索取心钻具,DCD取心钻具的内岩心管外直径较小,NQ内岩心管外直径为50 mm,该DCD内岩心管外直径仅为35 mm(见图3),主要目的是通过减小内岩心管直径,以增大内外岩心管的环状空间,为DCD取心钻具的偏心圆机构、定向造斜机构留取更多的环状空间。以实现钻孔连续变向的同时,达到连续取心的目的。岩心卡取机构由卡簧和卡簧座组成。与NQ钻具卡簧卡断岩心原理一致,DCD取心工艺,其岩心直径为31.5 mm,小于NQ岩心直径(47.5 mm)。



(a)内岩心管

(b)岩心卡取机构及岩心

图3 DCD钻具内岩心管及岩心卡取机构

Fig.3 Core tube and core sticking mechanism in DCD drill tool

3.1.3 定向原理及方法

变向偏心圆控制机构通过调整空心圆柱体的偏心距(记为 e)改变钻头与钻具轴线的偏移量(图4)。根据几何关系,钻具在孔内的弯曲曲率(k)与偏心距 e 和钻具长度 L 相关,可表示为:

$$k=2e/(L^2 + e^2)$$



(a) 机构所在钻具的位置



(b) 机构零部件

图4 DCD 钻头变向控制机构

Fig.4 DCD bit steering control mechanism

该公式表明,通过调节偏心距级别(1~7级),可量化控制钻孔轨迹的弯曲强度。例如,当 $e=10\text{ mm}$ 、 $L=3.2\text{ m}$ 时,曲率 $k\approx 0.0019\text{ mm}^{-1}$,对应造斜率约 $7^\circ/30\text{ m}$,与工程中实际采用的 $9^\circ/30\text{ m}$ 范围吻合(表1)。这一理论模型为钻具变向幅度设计提供了依据。

表1 DCD取心时的推荐参数

Table 1 Recommended parameters for DCD coring

参 数	指 标
NQ 钻具变轨曲率	$9^\circ/30\text{ m}$, 半径 180 m
转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	300~800
给进压力/kN	15~25
进尺速度/ $(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	3
生产效率	9~27 m/12 h(相当于常规绳索取心钻进的50%~75%)

DCD 钻具变向控制机构的核心零部件为一个厚度不均的金属空心偏心圆柱体(参见图4b)。该圆柱体的空心轴线与钻具轴线之间存在预设的静态偏心距(e),且其周向安装角度可通过外部调节机构动态调整。当需要改变钻进方向时,通过旋转偏心圆柱体使其厚壁侧朝向目标偏转方向(如向上、向左等),此时钻头中心与钻具轴心线的距离(ΔL)因偏心效应发生偏移($\Delta L=e\sin\theta$, θ 为偏心体旋转角),从而打破钻具受力平衡,引导钻头向目标方向

偏转。变向控制机构设有7个调节级别,分别对应不同偏心距($e_1\sim e_7$)或旋转角度组合,通过逐级增大偏心效应可精确控制钻具变向幅度。

DCD 钻具定向造斜机构(见图5)是由液压阀门控制,泥浆泵压增大,在泵压压力下使定向板弹出,定向板伸出后,定向板与坚硬岩层孔壁表面紧密接触,作为钻具改变方向的着力点,提供反力以改变钻具方向,配合调整好的钻头工具面方位角,实现定向钻进。



(a) 机构所在钻具的位置



(b) 工具面方位角定位圆尺

图5 DCD 钻具定向造斜机构

Fig.5 DCD drilling tool directional deflecting mechanism

3.1.4 定向孔轨迹测量方法

钻孔轨迹测量使用的仪器是DeviTool-Devico Peewee 测量工具(见图6),水平钻孔轨迹绘制软件为Devisoft。测量频率为直线段每15 m一次、曲线段每5 m一次。测量数据在钻孔直线段以3 m间隔、曲线段以1 m间隔通过Devisoft软件插值生成,插值算法基于钻具运动学模型与实测数据融合,确保轨迹重建精度满足工程要求,测量数据包括每个点的深度、方位角、倾角、北和东坐标、高程等。将数据输入相应软件,绘制出钻孔轨迹。



图6 DCD取心工艺钻孔轨迹测量仪器

Fig.6 DCD coring process drilling trajectory measuring instrument

3.2 长距离定向孔连续取心工艺原理与方法

针对项目要求和技术难点,该工艺技术是将NQ绳索取心工艺和DCD(Device Core Drill)定向取心工艺创造性的结合在一起,该工艺方法使用过程中,需要根据钻孔轨迹设计要求,2种取心工艺交替进行。具体原理和使用方法如下:

(1)钻孔变向造斜曲线段时,采用DCD取心钻具,在钻孔变向的同时达到连续取心的目的。将DCD定向取心钻具及取心钻头连接在NQ钻杆最下方,下入钻孔,进行定向连续取心钻进,岩心内管中的岩心通过绳索打捞器提取,获取岩心。在将DCD定向钻具放入孔内实施定向钻进前,需要完成以下3个重要步骤:①根据钻孔轨迹即将需要变向的方向,设定工具面、定向造斜机构的方位角。具体方法是使用一个具有 360° 的圆形角度尺,将其卡在钻杆上,将工具面、定向造斜机构转动至角度尺设定的方位角度位置;②确定变向造斜程度。变向程度控制机构有7个级别,每增加一级,钻具变向程度加大一个幅度。造斜度数字刻度需要和钻具表面向下的箭头保持在一条直径上;③使钻具定向扳机构开始工作。其工作原理为,当钻具下放至设计孔深位置时,通过泥浆泵增大泵压,在泵压压力下使定向板弹出,定向板伸出后,定向板与坚硬岩层孔壁表面,紧密接触,作为钻具改变方向的着力点,提供反力以改变钻具方向。定向钻进过程中取心钻进5 m后,需要放入测量仪器,对所定向区段孔位进行测量,以确定钻孔轨迹是否按照既定轨迹偏转。

(2)钻孔常规非变向水平段。采用常规的NQ绳索取心工艺进行取心钻进。每钻进15 m,需要使用Devico测量仪器对钻孔位置数据进行测量,以核

实钻孔轨迹是否偏离限界靶区,若偏离,需要换用定向取心钻具进行纠偏工作。

(3)当斜线段、水平段钻孔轨迹偏离预定的轨迹时,使用DCD定向取心技术,对钻进轨迹进行纠偏。

3.3 风险应对措施

(1)钻孔轨迹脱离垂直水平公差 ± 5 m范围的风险。钻进过程中HDC3-1钻孔轨迹必须位于隧道顶部上方6 m处,且在 ± 5 m公差范围内。因此,采取的风险应对措施是正确使用DCD定向取心工艺,加强钻孔轨迹测量工作,严格控制钻进参数,根据测量数据,及时调整工具面向角进行纠偏,使钻孔按照设计的轨迹延伸。

(2)长距离无法连续取心的风险。采取的风险应对措施是DCD取心工艺变向曲线段,需要设定合理的变向曲线段弧度,曲线阶段钻进过程中严格控制钻进规程,使取心钻具不产生卡钻、断钻、堵心等问题,以实现连续取心。

4 工程应用情况

4.1 勘察钻孔孔身设计

如图7所示,钻孔孔身采用四开孔身结构。一开孔段,使用 $\varnothing 178$ mm钻头钻至18 m深度,下入PW套管,套管外径为 $\varnothing 140$ mm,内径为 $\varnothing 127$ mm,稳定孔壁,作为导向管。二开孔段,使用 $\varnothing 120$ mm三牙轮钻头钻至孔深60 m,地层主要以花岗岩GⅣ~GⅤ地层为主,下入HW套管,套管外径为 $\varnothing 114$ mm,内径为 $\varnothing 100$ mm。三开孔段,使用 $\varnothing 95$ mm三牙轮钻头钻至74 m基岩位置,GⅢ/GⅡ地层,下入NW套管,NW套管外径为 $\varnothing 89$ mm,内径为 $\varnothing 79$ mm。三开孔段以下,使用NQ($\varnothing 75$ mm)取心钻头,

并使用绳索取心钻具进行取心钻进。各开次钻头直径、套管规格及目标深度均基于地层稳定性与取心需求优化设计,同时通过斜线段、曲线段与水平段的合理衔接,确保钻孔轨迹精准延伸至目标层位。

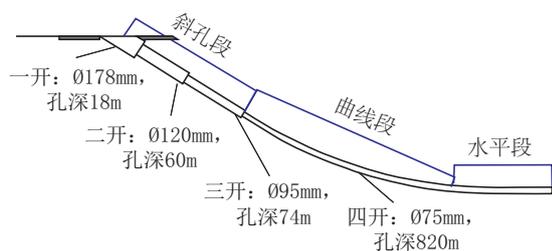


图7 钻孔设计

Fig.7 Borehole design diagram

4.2 钻机和钻具选型

根据项目技术难点,提出地质勘察设备采用瑞典阿特拉斯液压钻机(Atlas Copco Diamec U8 Rig, 见图8),U8钻机是市场上最强大的地下勘探钻机之一。钻机基本参数:主机外形尺寸长5050 mm×宽1432 mm×高1488 mm,主机质量25 t;最大钻探深度2000 m;最高转速1200 r/min;最大扭矩2300 N·m;给进/拉力133 kN;进尺长度1800 mm。钻具为NQ系列绳索取心钻具,NQ钻杆外径为70 mm,内径为60 mm。

4.3 DCD定向钻具取心钻进参数控制

DCD定向取心钻具长度为3200 mm,代表性井眼曲率5~9°/30 m,取心钻头直径为Ø75.7 mm,内



(a) 钻机主体



(b) 钻机控制面板

图8 阿特拉斯U8钻机

Fig.8 Atlas U8 rig

径为Ø31.5 mm,转速在300~1200 r/min,代表性进尺速度为3 m/h(参见表1)。

4.4 定向钻进连续取心岩土勘察成果

4.4.1 勘察孔轨迹控制成果

HDC3-1钻孔工程自2017年7月18日开始钻进,终孔时间为2017年9月3日,共计47 d,终孔长度为820 m,成功达到了要求和预定的目标,钻孔轨迹始终位于设计靶区范围内,水平段始终位于隧道顶部6 m,且控制在±5 m公差范围内,详见表2。

表2 钻孔轨迹信息汇总

Table 2 Summary of drilling trajectory information

区段	钻探进尺情况	关键点的坐标/m
斜线段位于强风化土以及强破碎岩层区域	总长度130.5 m(孔深0~130.5 m);土壤段74 m(孔深0~74 m),全面钻进;岩石段56.5 m(孔深74~130.5 m);NQ取心工艺取心累计长度56.5 m;DCD取心工艺取心累计长度:无	地表钻入点(P1)坐标:北37604.49;东26073.94;高程148.04
曲线段位于岩石质量相对较好的区段	曲线段总长度185.5 m(孔深130.5~316 m);NQ取心工艺取心累计长度79.7 m;DCD取心工艺取心累计长度105.8 m	曲线段起始点(P2)坐标:北37558.08;东25959.26;高程108.16
水平段沿着地铁隧道轨迹	HDC总长度504 m(316~820 m);NQ取心工艺取心累计长度420.7 m;DCD取心工艺取心累计长度83.3 m	水平段起始点(P3)坐标:北37532.30;东25782.16;高程61.46

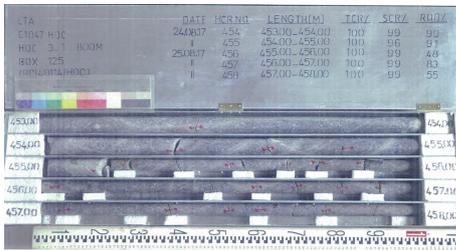
4.4.2 长距离勘察孔连续取心成果

与常规立式垂直钻机相比,该新型定向连续取心技术,具备岩心采取率高的优点,HDC3-1钻孔746 m的取心长度,岩心损失长度仅为5.9 m,岩心

损失率仅为0.8%,目标孔段的取心是连续的,为后期隧道设计提供了更加全面的依据(见图9)。

4.4.3 综合地质评价

通过岩土勘察发现,HDC3-1地质勘察孔所在



(453~455.2 m: \varnothing 47.5 mm NQ 岩心; 455.2~458 m: \varnothing 31.5 mm DCD 岩心)

图9 长距离定向连续取心典型岩心照片

Fig.9 Typical core photograph of LDC

区域主要以武吉知马花岗岩(Bukit Timah Granite)为主。武吉知马由花岗岩、二长岩和花岗闪长岩以及各种杂岩组成,颜色一般是浅灰色到深灰色。风化残积土的颜色根据氧化铁矿物的含量从红色到白色不等。风化残积土根据石英、长石和镁铁矿物的含量不同,可分为砂质、粉质黏土、砂质、黏土粉质、黏土砂等。

5 讨论

本文提出的长距离定向连续取心技术通过创新性整合DCD定向取心工艺与NQ绳索取心工艺,成功解决了传统勘察技术中轨迹控制难、取心连续性差、效率低等核心问题。结合新加坡HDC3-1项目的应用实践,本研究不仅验证了该技术的可行性与实用性,更为岩土工程勘察领域提供了一种高效、经济且环境友好的新方法。

5.1 技术优势与创新性

传统定向钻进技术虽能实现高精度轨迹控制,但因频繁提钻取心导致作业中断,难以兼顾连续取样需求;而常规绳索取心技术(如NQ系列)虽能连续取心,却因缺乏动态导向能力,无法适应复杂地层中的轨迹调整需求。技术的核心创新在于将2类技术的优势深度融合:

(1)基于DCD的动态轨迹修正算法与高精度导向工具,有效抑制了长距离钻孔的轨迹偏移,尤其在软硬互层或破碎带等复杂地层中,显著提升轨迹控制能力,目标层位命中率高;

(2)优化钻具、岩心管结构设计,确保定向钻进过程中岩心的连续完整提取;

(3)该技术通过工艺集成,大幅减少起下钻次数,使单孔作业时间缩短,综合成本降低,同时减少

了泥浆消耗与废弃物排放,符合绿色勘察的发展趋势。

5.2 工程实践意义

新加坡HDC3-1项目的成功应用是本文介绍技术实用性的重要佐证。该项目面临湖泊复杂地层(如松散砂层与黏土互层、局部基岩破碎带)的挑战,传统方法需频繁调整轨迹并分段取心,工期长且岩心质量不稳定。采用该技术后,钻孔轨迹偏差控制在目的岩层区域公差 ± 5 m范围内。并且该技术具有取心连续、岩心采取率高的优点。连续获取了长达746 m的完整岩心序列,岩心损失长度仅为5.9 m,岩心损失率仅为0.8%,为精准分析地层结构、力学参数及地下水分布提供了可靠依据,为后期隧道设计、施工提供了更加全面的地质依据。此外,该技术通过减少设备搬运与泥浆使用,降低了施工现场的生态扰动,尤其在环境敏感区域(如新加坡中央蓄水池自然保护区)展现出显著优势,HDC3-1水平定向孔施工占地面积小,以水平孔方式从新加坡中央蓄水池自然保护区底部穿过,避免了对环境造成的污染。与传统的立轴式钻机勘察技术相比,本文中的勘察新技术具备效率更高、工期短、成本低的优势。

这一案例表明,该技术不仅适用于常规岩土勘察,也为国内城市轨道交通岩土勘察领域提供了新技术,新理念。还可拓展至地质灾害监测、矿产资源勘探等场景,具有广泛的工程应用前景。

5.3 局限性与未来研究方向

尽管本文介绍的技术展现出显著优势,但其应用仍存在一定局限性:首先,当前技术验证仅基于单一工程案例(HDC3-1项目),其普适性需在不同地质条件(如超硬岩层、高应力破碎带)中进一步验证;其次,国内尚未建立相关技术标准与操作规范,亟需开展本土化适配研究。未来工作应聚焦于以下方向:

(1)拓展该技术在不同地层中的适用性测试,优化导向算法与钻具材料以应对极端地质条件;

(2)开发智能化监控系统,实时反馈轨迹偏差与岩心质量,进一步提升作业自动化水平;

(3)结合生命周期成本分析,量化该技术的长期经济与环境效益,为其规模化应用提供决策支持。

6 结论

本文介绍的技术通过突破传统工艺的技术壁垒,实现了长距离定向钻进与连续取心的协同优化,项目结果表明,该技术不仅成功克服了长距离定向孔轨迹漂移问题,且岩心采取率高,较传统方法,工期短、综合成本低,为岩土工程勘察提供了一种高效、精准且可持续的解决方案。其成功应用不仅推动了勘察技术的革新,也为复杂地下空间开发与资源勘探奠定了技术基础。未来随着智能化与绿色化技术的深度融合,该技术有望成为勘察行业的核心竞争力之一,助力地下工程高质量发展。

参考文献 (References):

- [1] 赵飞涛,窦斌,陶维显,等.定向钻探技术在复杂城区隧道勘察中的应用及探讨[J].钻探工程,2023,50(5):125-132.
ZHAO Feitao, DOU Bin, TAO Weiyu, et al. Application of directional drilling technology in tunnel exploration in complex urban areas[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 125-132.
- [2] 郑君,颜谢材,窦斌,等.长距离水平定向钻探在引江补汉地质勘察工程中的应用[J].钻探工程,2023,50(S1):205-210.
ZHENG Jun, YAN Xiecai, DOU Bin, et al. Application of long distance horizontal directional drilling in geological exploration project of Yangtze-replenish-Han Project[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 205-210.
- [3] 杨培涛,吴刚.市政管道定向钻穿越勘察施工中的岩土工程问题探究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2022,23(1):24-27,34.
YANG Peitao, WU Gang. Research on geotechnical engineering problems of directional drilling through municipal pipelines in investigation and construction[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 24-27, 34.
- [4] 石浩.精准定向钻进技术在煤矿水害治理应用[J].煤炭工程,2018,50(3):75-78.
SHI Hao. Application of precise directional drilling technology in coal mine water hazard treatment[J]. Coal Engineering, 2018, 50(3): 75-78.
- [5] 刘郡.水平定向钻进取芯钻具关键技术研究[J].科学技术创新,2022(5):131-135.
LIU Jun. Research on key technology of horizontal directional coring tools[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2022(5): 131-135.
- [6] 陈云龙,刘耿仁,蔡家品,等.长距离水平定向孔取芯技术应用——以天山胜利隧道水平定向孔地质勘察为例[J].隧道建设(中英文),2023,43(S1):298-303.
CHEN Yunlong, LIU Gengren, CAI Jiapin, et al. Application of long-distance horizontal directional borehole coring technology: A case study of geological investigation of Tianshan Shengli Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 298-303.
- [7] Rodríguez R, Fernández V, Bascompta M, et al. Directional core drilling as an approach to reduce uncertainty in tunneling construction[J]. Applied Sciences, 2023, 13(19): 10998.
- [8] 赵驰,黄文新,智刚,等.定向转弯连续取芯的钻探技术研究[J].路基工程,2022(1):122-129.
ZHAO Chi, HUANG Wenxin, ZHI Gang, et al. Research on continuous coring drilling technology with directional turning[J]. Subgrade Engineering, 2022(1): 122-129.
- [9] 张恒春,刘广,吴纪修,等.川藏铁路3000 m水平定向钻井技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):1-6.
ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, et al. Technical plan for 3000m long horizontal directional drilling for Sichuan-Tibet Railway[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11): 1-6.
- [10] 张小平,石绍云,梁俊俊,等.超长水平孔绳索取心定向斜钻及测井技术研究示范[J].钻探工程,2023,50(S1):211-217.
ZHANG Xiaoping, SHI Shaoyun, LIANG Junjun, et al. Research and demonstration of wire-line coring directional deviation correction drilling and logging technology for ultra-long horizontal hole[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 211-217.
- [11] 胡郁乐,赵海滨,姚震桐.坑道定向钻进系统在隧洞水平勘探工程中的适应性分析[J].钻探工程,2023,50(5):116-124.
HU Yule, ZHAO Haibin, YAO Zhen tong. Adaptability analysis of tunnel directional drilling system in tunnel horizontal exploration engineering[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 116-124.
- [12] 韩泽龙,李小洋,施山山,等.定向钻进连续取芯钻具设计及取芯参数仿真分析[J].钻探工程,2025,52(1):39-46.
HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 39-46.
- [13] Lee H S, Zhou Y X. Status and issues for underground space development in Singapore [J]. Tunnel and Underground Space, 2018, 28(4): 304-324.
- [14] Zhang W G, Zhang R H, Han L, et al. Engineering properties of the Bukit Timah Granitic residual soil in Singapore[J]. Underground Space, 2019, 4(2): 98-108.

(编辑 王文)